

**КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННЫХ
КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ. ЧАСТЬ 6**

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В.,
Новоселова М.В., 2024

Аннотация. Продолжено описание конструкций установок и методик исследования фрикционных и электрических характеристик пар трения и электроконтактных материалов. Приведено описание конструкции установки, разработанной для экспериментального исследования коэффициента трения, переходного электрического сопротивления и интенсивности изнашивания сильноточного скользящего электрического контакта в режиме граничного трения при повышенных температурах. Указано, что с помощью данной установки можно проводить сравнительные испытания электроконтактных и смазочных материалов и выбор их оптимального сочетания.

Ключевые слова: коэффициент трения, контактное сопротивление, интенсивность изнашивания, электроконтактные материалы, смазочные материалы, температура.

**THE SYSTEM OF EQUIPMENT FOR TESTING
OF ELECTROFRICTIONAL CONNECTIONS. PART 6**

Abstract. The article continues to describe the designs of installations and methods for studying the frictional and electrical characteristics of friction pairs and electrical contact materials. A description of the design of the installation developed for the experimental study of the friction coefficient, transient electrical resistance and wear rate of a high-current sliding electrical contact in the boundary friction mode at elevated temperatures is given. Using this installation, it is possible to conduct comparative tests of electrical contact and lubricants and select their optimal combination.

Keywords: friction coefficient, contact resistance, wear rate, electrical contact materials, lubricants, temperature.

Введение

Практически все типы электрических контактов, кроме неразборных (сварных и паяных), можно считать фрикционными парами [1, 2]. Скользящие электрические контакты, будучи безусловно фрикционными узлами, имеют специфику, связанную с их основной функцией – переносом носителей заряда через контакт деталей при их относительном движении. Взаимосвязь фрикционных и электрических процессов осложняет выбор материалов, удовлетворяющих одновременно триботехническим и электротехническим критериям качества и

надежности скользящих электрических контактов. В сильноточных скользящих контактах существенную роль играет температурный фактор. Применение смазочных материалов оказывает как положительное, так и отрицательное воздействие на надежность таких контактов, поэтому экспериментальные исследования материалов для сильноточных скользящих контактов имеют большое значение для обеспечения качества и эффективности самых различных типов электротехнического оборудования.

**Установка для исследования материалов
для сильноточных скользящих электрических контактов**

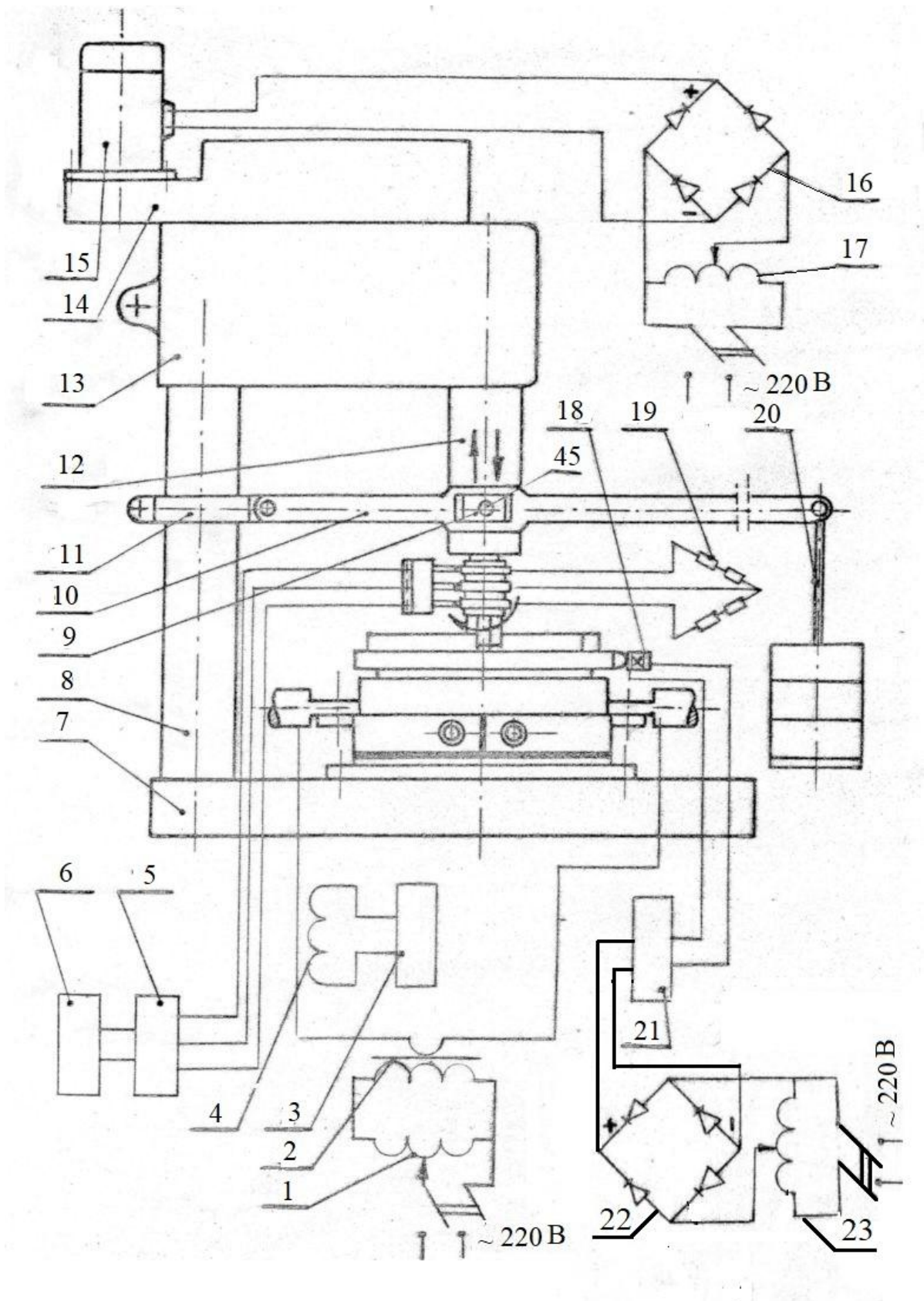
Описываемая установка относится к классу машин трения торцевого типа с коэффициентом взаимного перекрытия $K_{вз} \rightarrow 0$ [3]. Непосредственно электрофрикционное соединение представляет собой скользящий контакт вращающегося диска и двух неподвижных пальчиковых образцов. В установке предусмотрена возможность одновременного измерения как в статике, так и в динамике следующих параметров: силы трения, средней температуры контакта, силы тока и электрического переходного сопротивления.

Рабочие характеристики установки приведены ниже:

Диапазон контактных нагрузок _____	50–800
Диапазон номинальных контактных давлений, МПа _____	0,3–5
Диапазон скоростей скольжения, м/мин _____	0,1–3
Диапазон температур (с водяным охлаждением), °С _____	20–90
Максимальный ток, А _____	5 500
Максимальная плотность тока, А/мм ² _____	35

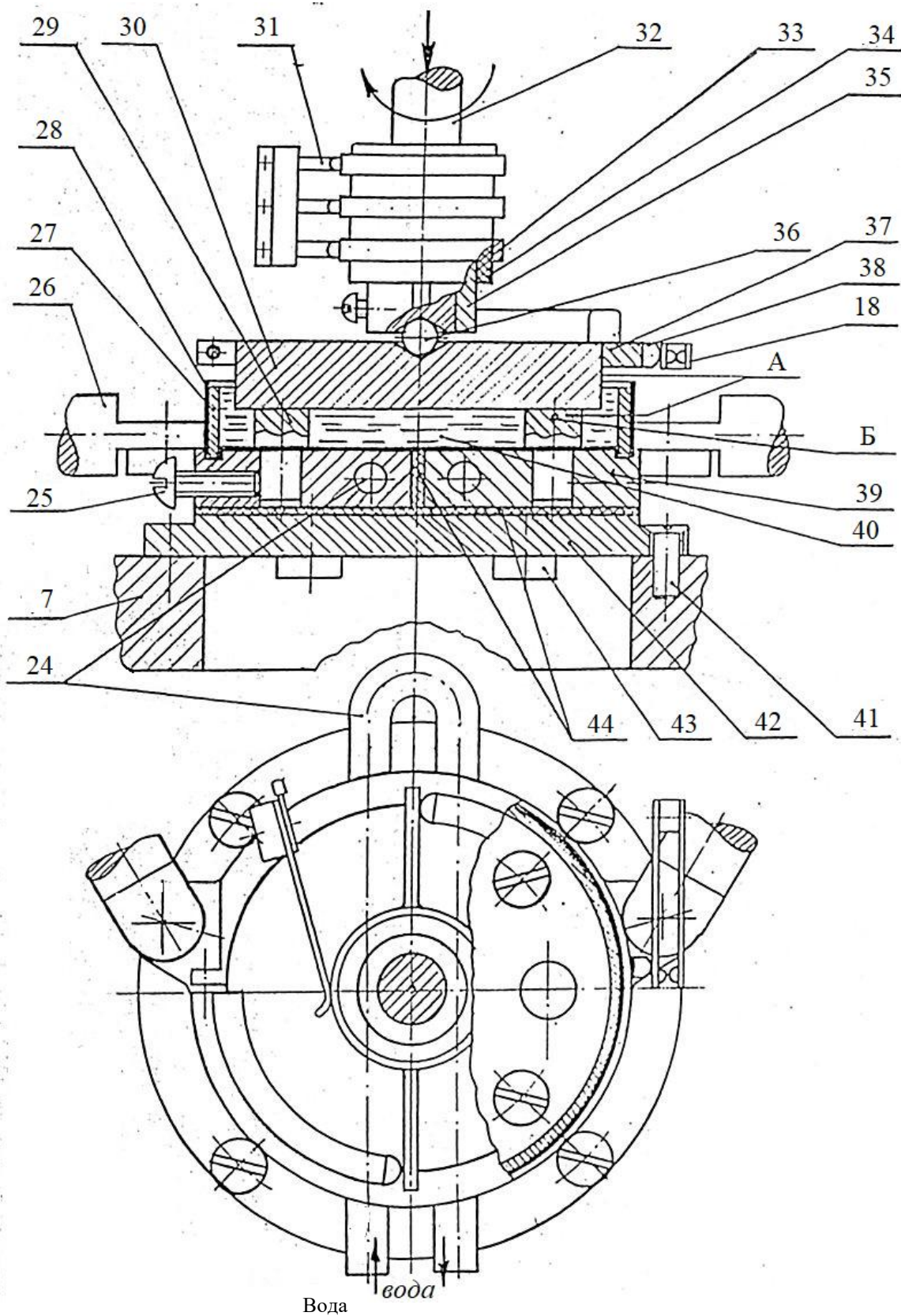
Установка состоит из девяти систем: подвода и измерения тока, нагружения, привода, измерения силы трения, измерения контактного сопротивления, измерения температуры, отсчета числа оборотов, смазки и охлаждения. На рис. 1а изображена общая схема установки и схемы электрических цепей, а на рис. 1б – схема рабочего узла этой установки.

Система подвода и измерения тока служит, как следует из ее названия, для подвода тока к образцам (диску 30 и пальчиковым образцам 29) и измерения величины тока, протекающего через контакт. Регулирование величины тока производится автотрансформатором 1. Напряжение с автотрансформатора подается на первичную обмотку сильноточного трансформатора 2, вторичный виток которого выполнен в виде медной охлаждаемой шины. От вторичного витка силового трансформатора ток проходит по токопроводам 26, жестко соединенным с полудисками 39.



а

Рис. 1. Установка для испытания материалов для скользящих электрических контактов:
а – общая схема; б – рабочий узел



Вода
 вода
 б
 Рис. 1. Продолжение

Полудиски, выполненные из электролитической меди с покрытием серебром, изолированы между собой и другими деталями прокладками из слюды 44 и полиэтиленовой пленкой 28. Резьбовыми втулками 43 полудиски крепятся к диску 42, который, в свою очередь, винтами 41 фиксируется на основании 7. От полудисков ток проходит через пальчиковые образцы 29, закрепленные на полудисках винтами 25. Замыкание цепи реализуется верхним подвижным образцом – диском 30. Измерение величины тока производится с помощью катушки 4, зафиксированной на токоподводящей шине, и милливольтметра 3.

Система нагружения предназначена для приложения нормальной нагрузки определенной величины к образцам. В установке применена рычажная система нагружения, что обеспечивает постоянство нормальной контактной нагрузки в течение всего цикла испытаний. С одной стороны, рычаг 10 шарнирно соединен с зажимом 11, который может перемещаться по колонне 8 и фиксироваться на ней; а с другой – на рычаг подвешиваются грузы 20. В средней части рычаг опирается на ползун 9, который может перемещаться вдоль рычага. Ползун шарнирно закреплен при помощи штифта 45 на оси 12, имеющей возможность перемещаться вверх и вниз вдоль кронштейна 13, фиксируемого на колонне 8, жестко закрепленной на основании 7. От оси 12 нагрузка передается через вал 32 и шарик 36 на диск и два пальчиковых образца.

Система привода служит для относительного движения образцов (диска относительно двух неподвижных пальчиковых образцов) с заданной скоростью. Скорость скольжения определяется числом оборотов диска. Так как пальчиковые образцы в установке расположены на диаметре 44 мм, то путь трения каждого пальчикового образца за один оборот диска составит 138 мм. Привод осуществляется через лабораторный автотрансформатор 17, с помощью которого регулируется скорость скольжения; выпрямляющее устройство 16, собранное по мостовой схеме; электродвигатель постоянного тока 15, понижающий редуктор 14 и вал 32, на котором жестко зафиксировано коромысло 35. Плечи коромысла при вращении входят в зацепление с выступами зажимного кольца 37, жестко закрепленного на диске. Таким образом происходит поворот диска относительно неподвижных пальчиковых образцов с частотой от 7,0 до 22 об/мин, что соответствует линейной скорости от 1 до 3 м/мин.

Система измерения силы трения нужна для измерения силы трения между диском и двумя пальчиковыми образцами. Система включает в себя 4 тензодатчика 19, соединенных последовательно в две пары (одна пара наклеена на сжатые волокна плечей коромысла 35, а другая – на растянутые, благодаря чему образуется активный полумост измерительной схемы); три серебряных кольца 33, зафиксированные через изолирующую втулку 34 на цилиндрической части коромысла 35; три скользящих контакта 31, составляющие с кольцами 33 токосъемное

устройство; усилитель 5 и многопредельный самопишущий милливольтметр 6.

Система измерения контактного сопротивления. Контактное электрическое сопротивление R_c определялось по контактному падению напряжения U_c при известной силе тока I , протекающего через контакты: $R_c = U_c / I$. На рис. 1б показаны места «А» измерения падения напряжения на контакте. Для этого в пальчиковом образце на расстоянии 3–4 мм от рабочей поверхности размещено гнездо под контактный штырь. Регистрация падения напряжения на контакте осуществлялась милливольтметром класса 1,0.

Система измерения температуры. При прохождении сильных токов через контакт в последнем выделяется большое количество тепла. В отдельных точках фактического контакта может происходить значительное повышение температуры, определить которую практически невозможно, поэтому измеряется средняя температура контактной зоны. Это производится хромель-копелевыми термопарами, зачеканенными в отверстия «Б», расположенные на расстоянии 2 мм от рабочей поверхности пальчиковых образцов 29 (см. рис. 1б). ТермоЭДС регистрируется автоматическим потенциометром класса 0,5.

Система отсчета числа оборотов, как видно из ее названия, позволяет автоматически отсчитывать число оборотов диска. На зажимном кольце 37, жестко закрепленном на диске, имеется штифт 38. При каждом повороте диска штифт замыкает контакты 18 счетчика импульсов 21, производится отсчет числа оборотов. Питание счетчика импульсов производится от сети через лабораторный автотрансформатор 23 и выпрямляющее устройство 22, собранное по мостовой схеме.

Система смазки необходима для устранения схватывания, улучшения условий работы скользящих сильноточных контактов, увеличения теплоотвода и т.д. Для этого камера 40 заполняется жидким смазочным материалом. С целью устранения утечки смазочного материала под пальчиковые образцы 29 помещается полиэтиленовая пленка 28, а в прорези полудисков 39 вставляется кольцо 27 с изолирующей пленкой.

Система охлаждения предназначена для охлаждения витка силового трансформатора, токоподводящих шин и особенно для снижения температуры скользящих сильноточных контактов. На рис. 1б показаны вводы и отверстия 24, предназначенные для охлаждения скользящих сильноточных контактов.

Измерение величины износа. Указанное действие происходит после окончания эксперимента и реализуется с помощью отдельных приспособлений: износ диска определяется весовым методом с точностью 0,1 мг на аналитических весах; износ пальчиковых образцов – линейным методом с точностью 0,5 мкм с помощью специального устройства (рис. 2).

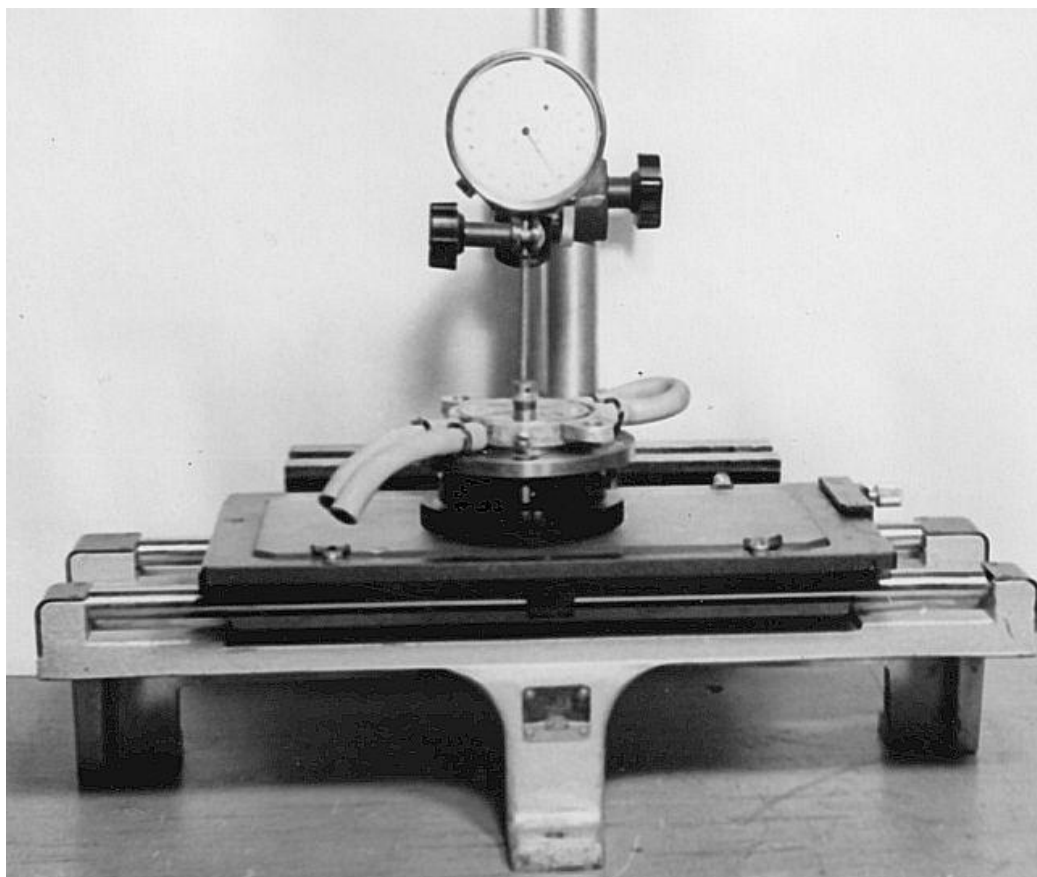


Рис. 2. Устройство для измерения износа пальчиковых образцов

Образцы и методика эксперимента

Верхний (подвижный) образец имеет форму диска диаметром 55 мм. Нижние образцы (два пальчика) выполняются в виде цилиндров диаметром 10 мм с посадочным диаметром 8 мм. В некоторых случаях ввиду малого количества или высокой стоимости материала (например, серебра), а также при затрудненной механической обработке (например, если обрабатываются высокотвердые металлокерамические материалы) пальчиковые образцы изготавливаются из меди с напайкой на них верхнего слоя (3–4 мм) испытуемого материала.

Перед началом эксперимента пальчиковые образцы жестко фиксируются в полудисках. В целях обеспечения плоскостности поверхности трения пальчиковые образцы необходимо протачивать в зафиксированном положении в сборе с деталями 24, 25, 28, 39, 42, 43 и 44 (см. рис. 1). При необходимости качество поверхности диска и пальчиковых образцов контролируется профилометром через определение параметров шероховатости. Далее рабочий узел с пальчиковыми образцами в сборе устанавливается на трехшариковую опору, как показано на рис. 3, и фиксируются вертикальные координаты десяти точек, расположенных равномерно на рабочих поверхностях двух пальчиковых образцов.

Верхний образец (диск) взвешивается. После этого происходит сборка установки: рабочий узел фиксируется винтами на основании, к нему прикрепляются токоподводы, подводится охлаждение, в камеру заливается смазочный материал (при необходимости), устанавливается верхний образец (диск) и прикладывается нормальная нагрузка. Далее контакт прирабатывается при 20 °С в течение 30–50 оборотов диска. Приработка необходима для получения воспроизводимых экспериментальных данных, так как в этот период происходит срезание отдельных случайных высот выступов шероховатости поверхности.

После окончания периода приработки проводятся необходимые эксперименты по программе исследований в течение заданного времени или на протяжении заданного пути трения. По завершении испытаний рабочий узел снова помещается на трехшариковую опору для измерения линейного износа пальчиковых образцов, а верхний образец (диск) взвешивается для определения массового износа. Если требуется, измеряются параметры шероховатости изношенных поверхностей образцов.

Некоторые экспериментальные результаты, полученные с помощью установки

Примеры фрикционных и электрических характеристик скользящего электрического контакта, полученных на описываемой установке в зависимости от режимов эксплуатации, приведены на рис. 3, 4.

Исследовалась пара трения электроконтактных материалов с высокой проводимостью, типичных для сильноточных контактов. Диск изготовлен из бронзы БрХ0,5 (0,5 % Cr) твердостью 1 300 МПа, пальчиковые образцы – из меди М1 с напаянной таблеткой серебра (99,9 % Ag) диаметром 10 мм, толщиной 3 мм и твердостью 400 МПа. Проводимость бронзы БрХ0,5 составляет не менее 0,8 от проводимости меди, серебра – 1,06 от проводимости меди.

В качестве смазочного материала во всех экспериментах использовалась композиция высокомолекулярных ненасыщенных жирных кислот.

С ростом номинального контактного давления коэффициент трения исследуемой пары увеличивается (рис. 3а), что свидетельствует о преобладании деформационной составляющей силы трения [4]. Это естественно для трения в режиме граничной смазки, когда трущиеся поверхности разделены адсорбированными молекулами смазочного материала, предотвращающими адгезионное взаимодействие твердых тел [4].

С ростом объемной температуры контактирующих тел коэффициент трения увеличивается (рис. 3б), что можно связать с изменениями в строении граничного слоя смазочного материала. Повышение температуры

способствует дезориентации адсорбированных молекул смазочного материала и их частичной десорбции с поверхности трения [4]. Это вполне вероятно, если иметь в виду, что температура непосредственно на поверхности трения может быть существенно выше объемной.

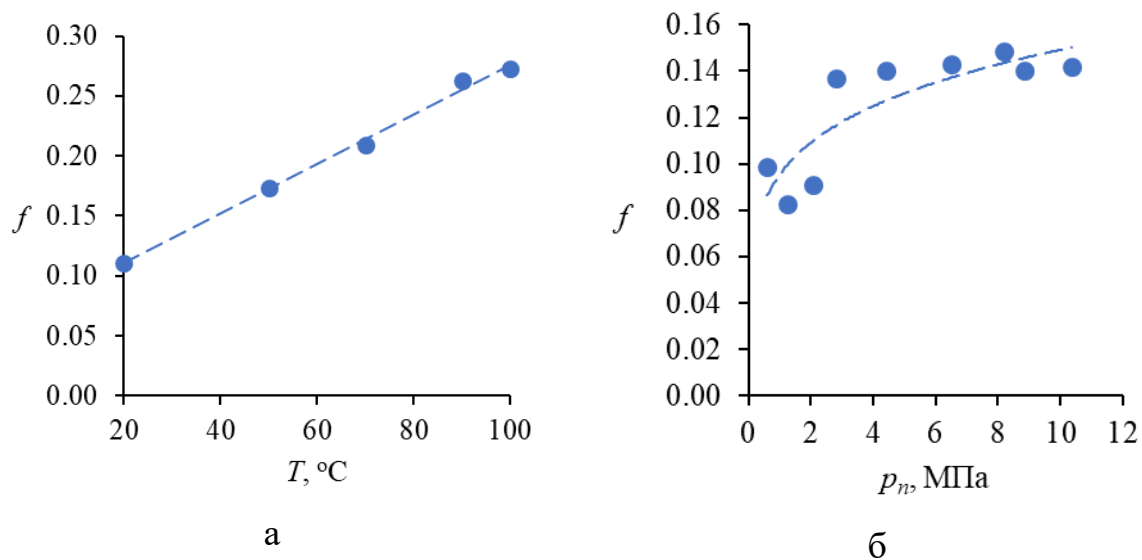


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f : а – от номинального давления при $T = 20$ °C; б – температуры при $p_n = 4,5$ МПа; точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующая зависимость

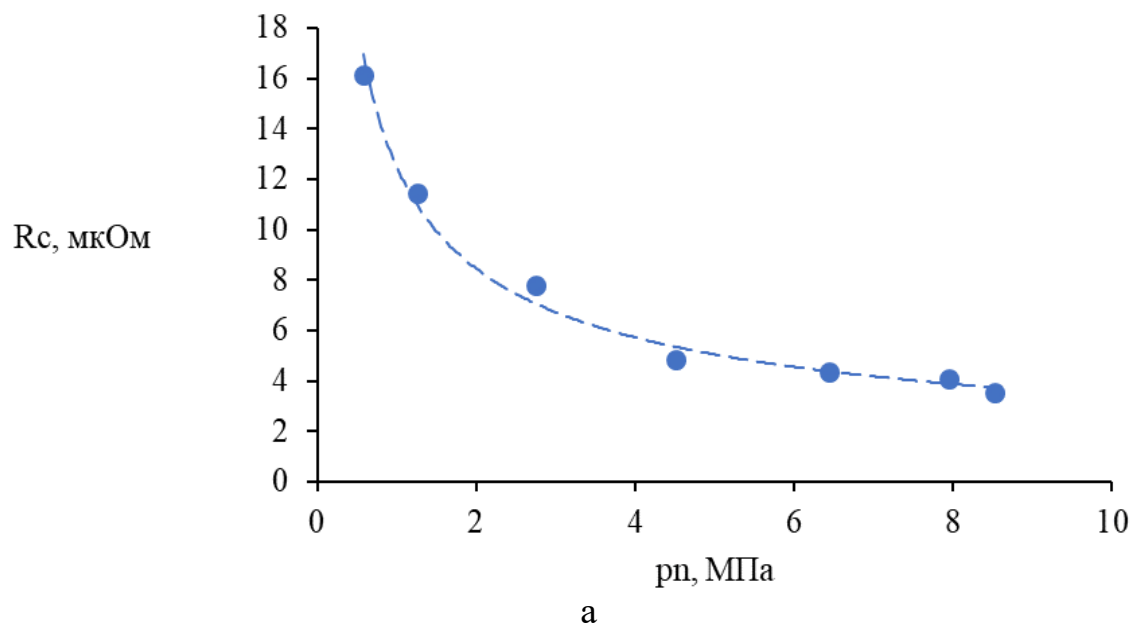
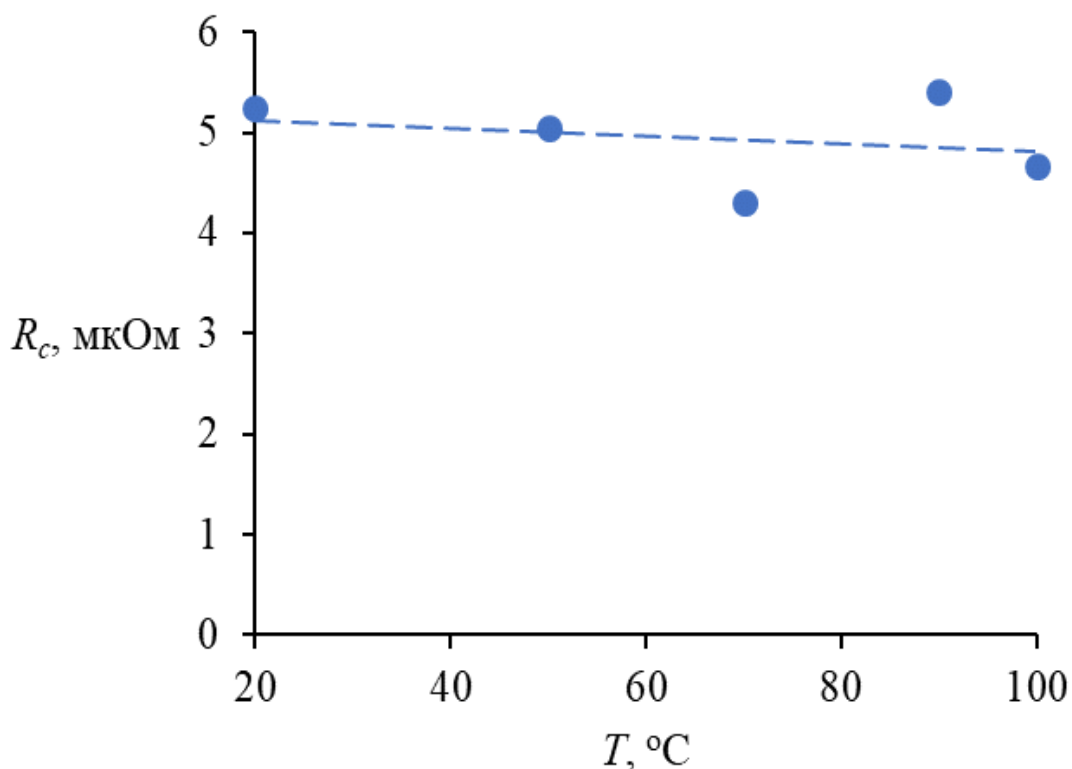


Рис. 4. Зависимость контактного сопротивления R_c : а – от номинального давления при $T = 20$ °C; б – от температуры при $p_n = 4,5$ МПа; точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующая зависимость



б

Рис. 4. Продолжение

Контактное электрическое сопротивление ожидается уменьшаться с ростом номинального контактного давления (см. рис. 4а), что является следствием роста фактической площади контакта неровностей шероховатости трущихся тел. Какого-либо значимого тренда в температурной зависимости контактного сопротивления в исследованном диапазоне температур не выявлено (см. рис. 4б).

Библиографический список

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 506 с.
2. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.
3. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Физические основы контактного взаимодействия, трения и изнашивания: монография. Тверь: ТвГТУ, 2024. 172 с.